

Metodyka analizy numerycznej współdziałania budynku z podłożem deformującym się wskutek eksploatacji podziemnej

LUCYNA FLORKOWSKA, JERZY CYGAN, JAN LEŚNIAK, KRZYSZTOF TAJDUŚ, JAN WALASZCZYK

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków

Streszczenie

Przewidywanie wpływu deformacji podłoża na stan ustroju budowlanego ma duże znaczenie w profilaktyce szkód górniczych w budowlach. Zaprojektowanie odpowiednich zabezpieczeń opiera się bowiem na wyznaczeniu stanu naprężenia zarówno elementów konstrukcyjnych, jak i podłoża obiektu. Rozwiązanie zagadnienia współpracy budynku z deformującym się podłożem jest jednak bardzo trudne z uwagi na jego złożoność. Konieczne jest uwzględnienie wielu czynników, takich, jak budowa geologiczna, warunki górnicze, warunki konstrukcyjne i eksploatacyjne obiektu oraz warunki panujące na kontakcie fundamentu z podłożem. Z tego powodu najwłaściwszym narzędziem rozważania tego zagadnienia wydaje się być analiza numeryczna.

Opracowanej w IMG PAN metodyka przewidywania skutków eksploatacji górniczej dla budowli oparta została właśnie na modelowaniu numerycznym prowadzonym metodą elementów skończonych.

Słowa kluczowe: modelowanie numeryczne, MES, szkody górnicze, budynek, podłoże

Wstęp

Zaprojektowanie i wykonanie odpowiedniego zabezpieczenia budynku, chroniącego go przed niekorzystnym oddziaływaniem eksploatacji, musi opierać się na wyznaczeniu sił wewnętrznych, jakie wywołuje w konstrukcji deformujące się podłoże. Jest to zadanie złożone, zważywszy, że łączy w sobie problemy mechaniki gruntów, mechaniki budowli, analizę zagadnień kontaktowych i prognozowanie górniczych deformacji górotworu. Wielu badaczy, zajmujących się podobnymi problemami sięga więc po narzędzie symulacji komputerowej (Majewski, 1995; Phoon i in., 2003; Xie, 1999).

W artykule przedstawiono wyniki prac nad zastosowaniem modelowania numerycznego dla wyznaczenia wpływu podziemnej eksploatacji górniczej na współpracujący układ podłoże – konstrukcja budowlana. Metodykę budowy modelu zagadnienia oraz prowadzenia analizy oparto na pakiecie programów metody elementów skończonych Abaqus.

Podstawową trudność w prowadzeniu analizy numerycznej tego zagadnienia stanowi fakt, że wymiary samego obiektu budowlanego są, w odniesieniu do wymiarów obszaru górotworu objętego wpływem eksploatacji, znikomo małe. O ile bowiem zbudowanie poprawnego modelu geometrycznego, o takim zagęszczeniu węzłów siatki w budynku, by uzyskać dla tego obszaru wiarygodne wyniki jest teoretycznie możliwe, to przeprowadzenie obliczeń wydaje się praktycznie niewykonalne, ze względu na ograniczenia sprzętowe, i oczywiście nieefektywne ze względu na szacowany czas ich trwania.

W opracowanej metodyce model zagadnienia nie obejmuje całego procesu eksploatacji, a uwzględnia jedynie wywołane wybieraniem pokładu deformacje warstw przypowierzchniowych gruntu. Model geometryczny obejmuje zatem budynek z fragmentem podłoża, którego wymiary dobrano w ten sposób, by poza nimi wpływ budynku na stan gruntu był już zaniedbywalny. Przyjęto, że deformacje na głębokości kilku metrów są w przybliżeniu równe deformacjom swobodnej powierzchni terenu. Założenie to pozwoliło przyjąć

jako warunki brzegowe modelu – przemieszczenia obliczane według teorii Budryka-Knothe'go. Zastosowanie sprężysto-plastyczno-lepkiego prawa materiałowego dla poszczególnych warstw geotechnicznych podłoża pozwoliło na uwzględnienie zjawisk takich, jak konsolidacja i rozluźnienie gruntu pod wpływem zmieniających się warunków obciążenia, wywołanych zarówno ciężarem budynku, jak i oddziaływaniem eksploatacji. Ponadto zamodelowanie procesu przechodzenia niecki górniczej jako funkcji odległości od frontu eksploatacji i czasu umożliwiło obserwowanie wpływu tego zjawiska na stan budynku i podłoża w dowolnym momencie czasu – a zatem i na dowolnym etapie formowania się niecki.

Obliczenia realizowano na klastrze komputerów składającym się z pięciu 32-bitowych węzłów, skonstruowanych na bazie platformy sprzętowej Intel Xeon, będącym w dyspozycji Laboratorium Obliczeń Numerycznych Mechaniki Ośrodków Wielofazowych IMG PAN, oraz na komputerze SGI Altix 3700 „Baribal” (64 procesory 64-bitowe Intel Itanium 2 1.5 Ghz) w ACK Cyfronet AGH.

Procedura prognozowania stanu budynku z wykorzystaniem modelowania numerycznego

Opracowana metodyka skierowana jest przede wszystkim do prowadzenia indywidualnych, szczegółowych analiz dla obiektów, które, z różnych względów, wymagają indywidualnego podejścia.

Proces prognozowania rozpoczyna się zawsze od szczegółowego rozpoznania lokalnych warunków w zakresie sytuacji górniczej, geologicznej, geotechnicznej, warunków wodnych oraz warunków konstrukcyjnych i eksploatacyjnych obiektu. Przeprowadzane są także badania laboratoryjne określające właściwości poszczególnych warstw geotechnicznych podłoża. Zebrane informacje stanowią bazę budowy modelu obliczeniowego zadania, które w ogólności składa się z modelu budowli, modelu podłoża, modelu oddziaływań górniczych oraz modelu kontaktu pomiędzy fundamentem a gruntem. Zbudowany model poddawany jest następnie dyskretyzacji geometrycznej i przestrzennej. Dobierane jest zatem odpowiednie zagęszczenie węzłów oraz rodzaj elementów skończonych a także przyrosty czasowe dla każdego kroku analizy. Po przeprowadzeniu obliczeń otrzymane wyniki poddawane są wnikliwej analizie i weryfikacji.

Modelowanie oddziaływań górniczych

Sercem metodyki stanowi moduł symulujący oddziaływanie eksploatacji. Jest to specjalnie opracowany program, współpracujący z solverem Abaqusa, który na brzegach modelu zadaje, zmieniające się w czasie i przestrzeni, przemieszczeniowe warunki brzegowe. Metodyka wykorzystuje zatem metody prognozowania górniczych deformacji powierzchni terenu i opiera się na przyjęciu założenia, że kilka metrów pod powierzchnią deformacje te są (z możliwym do przyjęcia przybliżeniem) takie same. Dotychczas program symulujący kształtowanie się niecki posługiwał się równaniami podanymi przez Budzianowskiego i Lessera (1966), które przybliżały zależności teorii Budryka-Knothe'go za pomocą funkcji trygonometrycznych. Metoda ta powodowała jednak pewne trudności obliczeniowe ze względu na fakt, że przyjęte równania dobrze opisywały kształt niecki tylko w granicach zasięgu wpływów eksploatacji. Ostatnio dokonana została zatem modyfikacja programu i obecnie do symulowania przebiegu niecki wykorzystywane są wprost równania teorii Budryka-Knothe'go (Knothe 1953a), w odniesieniu do kształtu geometrycznego niecki oraz teoria Knothe'go (Knothe 1953b), gdy chodzi o zmiany przemieszczeń w czasie.

Modelowanie podłoża obiektu

Opisany powyżej sposób modelowania oddziaływania eksploatacji pozwala na uwzględnienie niezmienne ważnego czynnika, jakim są właściwości mechaniczne podłoża. Przyjęcie sprężysto-plastyczno-lepkiego modelu materiałowego uwzględnia złożone mechanizmy, zarówno o charakterze kohezyjnym, jak i konsolidacyjnym, kierujące powstawaniem i rozwojem trwałych deformacji gruntu (Florkowska, 2003). Te zaś odgrywają decydującą rolę w procesie przekazywania oddziaływania eksploatacji z górotworu na budowlę. Przejmują bowiem znaczną część tych oddziaływań.

Nie zawsze jednak można zastosować ten sposób modelowania podłoża. Z uwagi na złożoną postać prawa materiałowego wymaga ona bowiem bardzo dokładnego rozpoznania geologicznego, wykonania odpowiedniej liczby odwiertów, pobrania próbek oraz zrealizowania określonego programu specjalistycznych

badań laboratoryjnych, kalibrujących parametry modelu materiałowego dla każdej z warstw geotechnicznych. W niektórych przypadkach może okazać się to niemożliwe. Zwłaszcza dla budowli już istniejących i znajdujących się w obszarze zwartej zabudowy. Dlatego też ostatnio prezentowana metodyka została rozszerzona o nowy moduł, który umożliwi przeprowadzenie szacunkowej analizy także wówczas, gdy istnieje dostęp do ograniczonej ilości danych na temat podłoża obiektu. Moduł ten pozwala na określenie parametrów transwersalnie izotropowego prawa materiałowego dla górotworu poddanego oddziaływaniu podziemnej eksploatacji metoda tzw. *back analysis*.

Wyznaczenie parametrów materiałowych górotworu przeprowadzane jest na podstawie:

- wyników pomiarów geodezyjnych obniżeń powierzchni terenu,
- wyników badań laboratoryjnych standardowo wykonywanych przez kopalnie dla górotworu w otoczeniu projektowanej eksploatacji
- oraz klasyfikacji geotechnicznej górotworu Hoek'a-Browna (GSI).

Podstawową zaletą tej metody jest fakt, że umożliwia ona przeprowadzenie analizy, z wykorzystaniem danych, które zwykle są w dyspozycji zakładu górniczego. Pozwala ona ponadto ocenić stan nie tylko budowli i jej podłoża, ale też całego górotworu w otoczeniu wyrobiska. Należy jednak pamiętać, że otrzymane rezultaty, jeżeli chodzi o stan konstrukcji i podłoża, mają charakter jedynie szacunkowy. Głównie z dwóch powodów: Po pierwsze model zadania obejmuje w tym przypadku nie tylko obiekt budowlany i jego podłoże, ale cały górotwór otaczający eksploatację. Jego rozmiary są zatem nieporównywalnie większe, co powoduje, że ograniczenia sprzętowe nie pozwalają na osiągnięcie takiego zagęszczenia węzłów siatki w obszarze modelu budowli, aby uzyskane wyniki miały zadowalającą do szczegółowej analizy dokładność. Problem ten występuje nawet przy wykorzystaniu techniki obliczeniowej *submodellingu* (Abaqus Theory Manua 1998). Po drugie, pamiętać należy, że zastosowany model materiałowy (transwersalnie izotropowy) nie uwzględnia mechanizmów kierujących powstawaniem trwałych deformacji gruntu, o których znaczeniu wspomniano już w tym rozdziale. Pominięte są także właściwości reologiczne, które, jak wiadomo, są bardzo istotne w mechanice gruntów, zaś w rozważanym zagadnieniu decydują o prognozowaniu stanu układu budowla – podłoże nie tylko w czasie prowadzenia eksploatacji, ale również po jej zakończeniu.

Modelowanie zjawiska nakładania się wpływów eksploatacji kolejnych pokładów

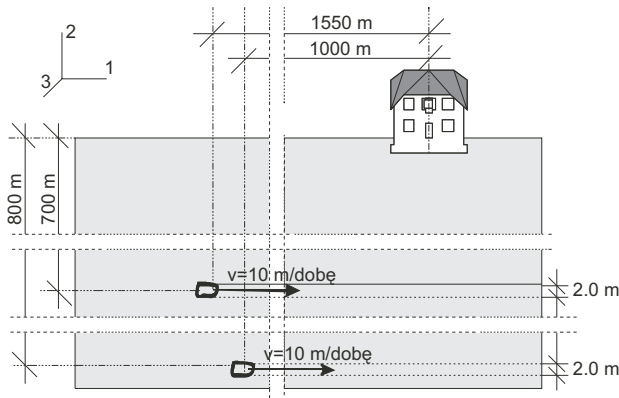
Omawiana metodyka została ostatnio rozszerzona również o kolejny moduł, umożliwiający modelowanie zjawiska nakładania się wpływów eksploatacji kolejnych ścian i pokładów. Zważywszy na fakt, że w Polsce nie otwiera się już w zasadzie nowych pól eksploatacyjnych, a górotwór na istniejących obszarach górniczych jest już mocno naruszony prowadzoną na przestrzeni wielu lat eksploatacją kilku, lub nawet kilkunastu pokładów, zagadnienie to jest niezwykle istotne. Modelowanie rozważanego zjawiska oparto na:

- modelu materiałowym podłoża, w którym uwzględnione są zarówno plastyczne, jak i reologiczne procesy trwałych deformacji;
- programie symulującym przebiegające w czasie i przestrzeni oddziaływanie eksploatacji;
- oraz technice obliczeniowej pozwalającej na wykorzystanie jako warunków początkowo-brzegowych zadania wyników innych analiz.

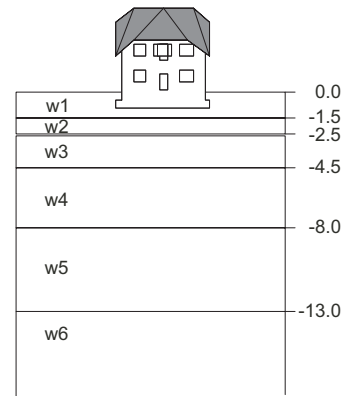
Ilustracja działania tej procedury przedstawiona zostanie poniżej na prostym przykładzie.

Przykład obliczeniowy

Schemat zadania pokazano na rys. 1. Rozważany jest powiązany warunkami kontaktowymi układ: budynek i jego podłoże, który to układ poddany jest oddziaływaniu eksploatacji kolejno dwóch pokładów. Pokład pierwszy ma miąższość 2.0 m i zalega na głębokości 700 m. Eksploatacja rozpoczyna się w odległości 1550 m od budynku i biegnie równoległe do jego osi z prędkością 10 m/dobę. Po sześciu latach rozpoczyna się eksploatacja drugiego pokładu, o tej samej miąższości, zalegającego na głębokości 800 m. Kierunek i prędkość eksploatacji są takie same, jak dla pokładu pierwszego.



Rys. 1. Schemat zagadnienia rozważanego w przykładzie obliczeniowym



Rys. 2. Układ warstw geotechnicznych w podłożu

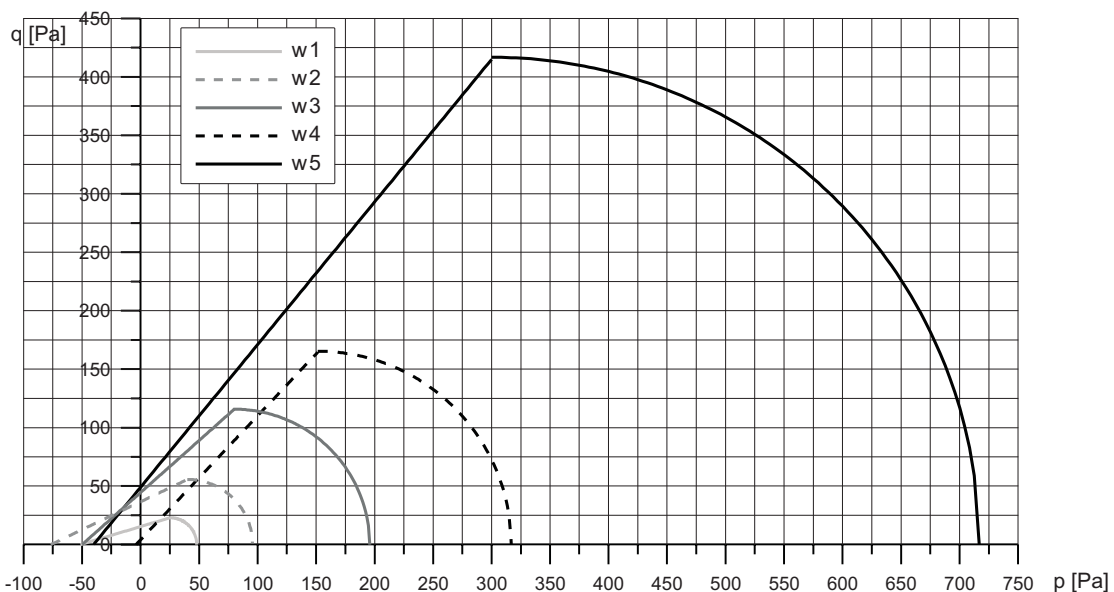
Układ warstw geotechnicznych w podłożu przedstawia rys. 2. Warstwy w1-w5 wykazują zachowanie sprężysto-plastyczno-lepkie. Przekroje powierzchni plastyczności płaszczyzną niezmienników dewiatora naprężenia p i q dla poszczególnych warstw podłoża przedstawiono na rys. 3. Oś pozioma p :

$$p = -\frac{1}{3}\sigma_{ii}$$

to oś ściskających naprężeń średnich. Na osi pionowej q to intensywność dewiatora naprężenia (tzw. zredukowane naprężenie Misesa):

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot S_{ij} \cdot S_{ij}}$$

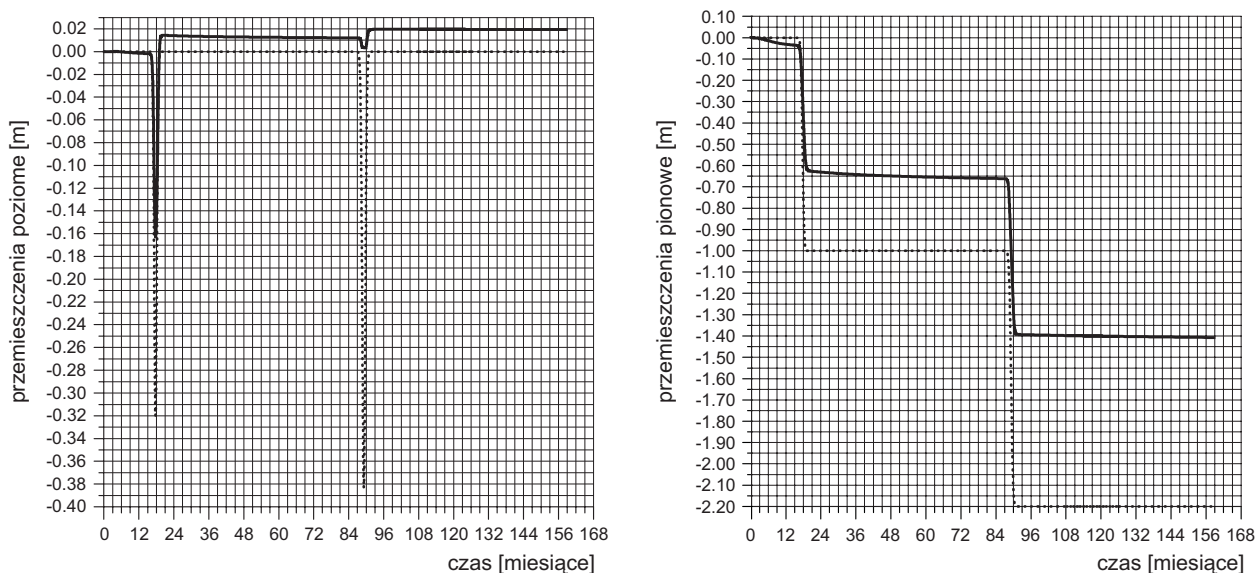
Poniżej 8 m pod powierzchnią zalegają już warstwy skalne, dla których przyjęto model liniowo-sprężysty.



Rys. 3. Przekroje powierzchni plastyczności płaszczyzną niezmienników dewiatora naprężenia dla poszczególnych warstw geotechnicznych podłoża

Na wykresach pokazanych na rys. 4 przedstawiono czasowy przebieg przemieszczeń pionowych i poziomych wywołanych samym ciężarem budynku a następnie przechodzeniem kolejno obu eksploatacji. Linia przerywana przedstawia przebieg tych przemieszczeń w czasie w punkcie na brzegu modelu. Jest

to zatem przemieszczenie zadawane jako warunek brzegowy, które odpowiada przemieszczeniu punktu swobodnej powierzchni terenu wg teorii Budryka-Knothe'go. Linia ciągła przedstawia natomiast przemieszczenie w punkcie o tej samej współrzędnej poziomej, lecz zlokalizowanym w podłożu, w pobliżu naroża fundamentu. Wykresy te pokazują, jak wskutek oddziaływania obiektu oraz trwałych odkształceń gruntu, niekorzystne skutki eksploatacji ulegają znacznej redukcji.



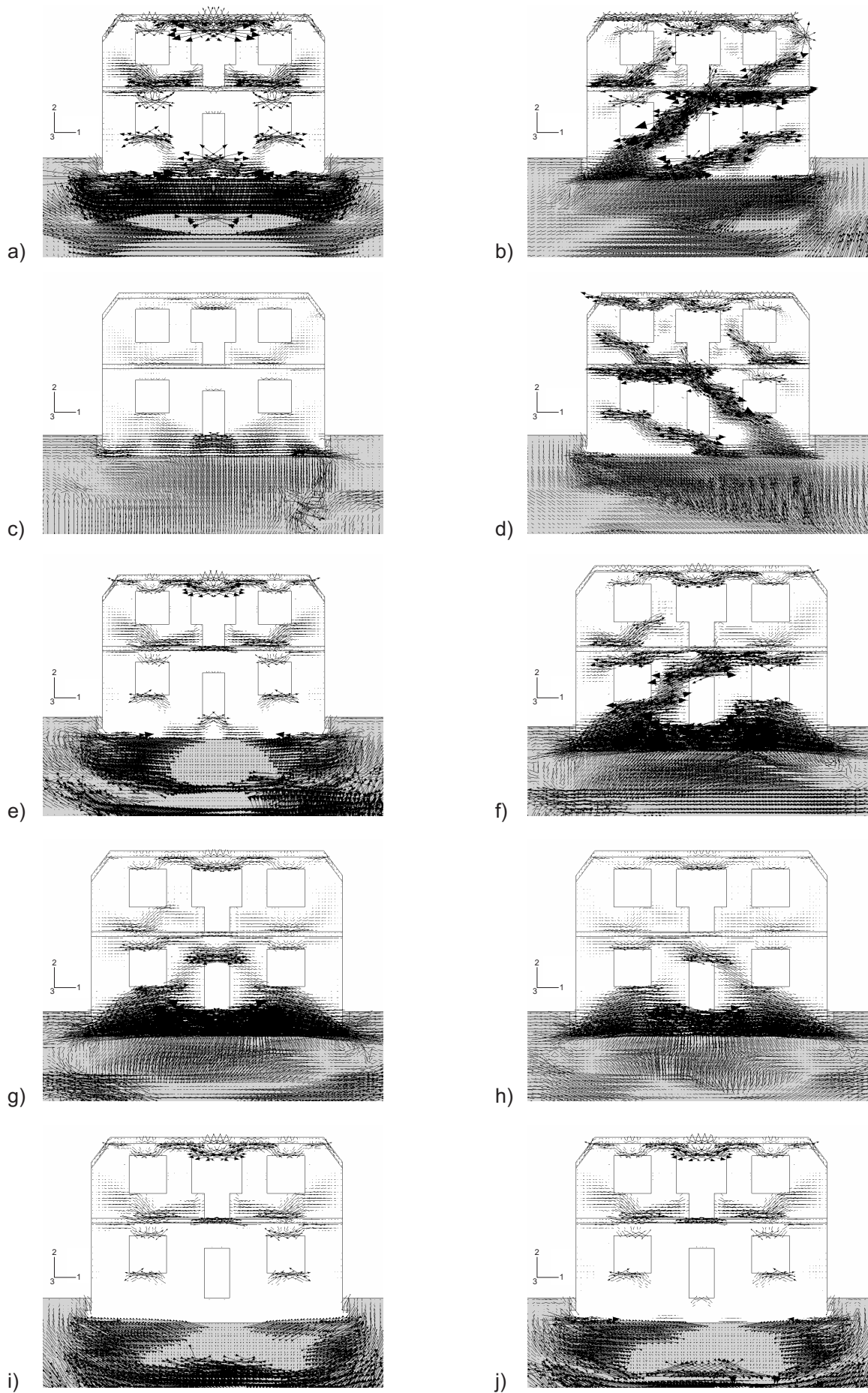
Rys. 4. Przebieg przemieszczeń poziomych i pionowych w czasie (linia przerywana – przemieszczenia zadawane jako warunek brzegowy; linia ciągła – obliczone przemieszczenia w punkcie podłoża zlokalizowanym w pobliżu naroża fundamentu)

Wpływ eksploatacji na konstrukcję obiektu oraz podłoże warto prześledzić obserwując zmiany stanu naprężeń głównych. Na rys. 5 pokazano kierunki tych naprężeń dla kilku etapów analizy. Strzałki wskazują kierunek maksymalnych naprężeń głównych, natomiast ich długość mówi o wielkości naprężenia. Rys. 5a przedstawia stan maksymalnych naprężeń głównych wywołany samym ciężarem obiektu oraz jego obciążeniem użytkowym. Następnie pokazano układ kierunków tych naprężeń, gdy budynek znajduje się na zboczu niecki i jest przechylony w kierunku wybranego pokładu. Widać, na jakich kierunkach można się spodziewać wystąpienia rys i spękań konstrukcji. Kolejny rysunek to stan maksymalnych naprężeń głównych po przejściu frontu eksploatacji poza budynek i zmianie nachylenia obiektu. W miarę oddalania się frontu eksploatacji nachylenia spadają, budynek prostuje się i po pewnym czasie naprężenia w konstrukcji już się nie zmieniają. Natomiast w podłożu wciąż przebiegają procesy reologiczne, które widoczne są w zmianach stanu naprężeń głównych jeszcze przez kilka lat po zakończeniu eksploatacji. Reakcja budynku na przejście eksploatacji drugiego pokładu przebiega analogicznie, jeżeli chodzi o charakter jakościowy. Natomiast wielkości zmian w stanie naprężeń głównych są znacząco mniejsze.

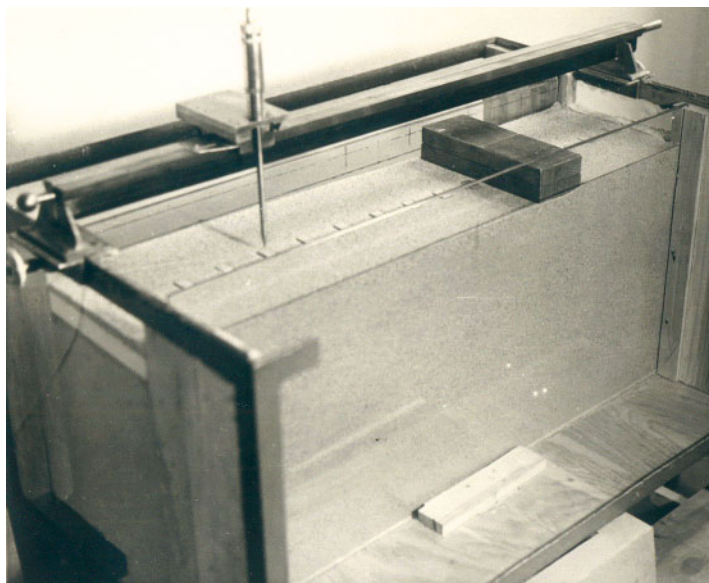
Weryfikacja jakościowa wyników modelowania numerycznego na modelu piaskowym

W wyniku prowadzonej eksploatacji górniczej występują ruchy terenu naruszające równowagę istniejącą między podłożem a budowlą powodując niejednokrotnie uszkodzenie budowli. Celem przeprowadzonych badań modelowych na ośrodku sypkim była próba określenia zależności pomiędzy przemieszczeniami występującymi w ośrodku w wyniku eksploatacji a zachowaniem się obiektu usytuowanego na powierzchni modelu.

Przeprowadzone przez Ryncarza (1960) eksperymenty, w których obciążenie powierzchni modelu dla poszczególnych obiektów wynosiło 15 g/cm^2 , 30 g/cm^2 i 45 g/cm^2 (rys. 6) wykazały bardzo duży wpływ obciążenia powierzchni na zmianę kształtu niecki osiadania. Również eksperymenty wykonane w Pracowni Przemyszczeń Górnotworu przy obciążeniu powierzchni ok. 30 g/cm^2 potwierdziły to spostrzeżenie (rys. 7). Ponieważ tak duże obciążenie powierzchni zmienia kształt niecki osiadania w zbyt wielkim stopniu, zde-

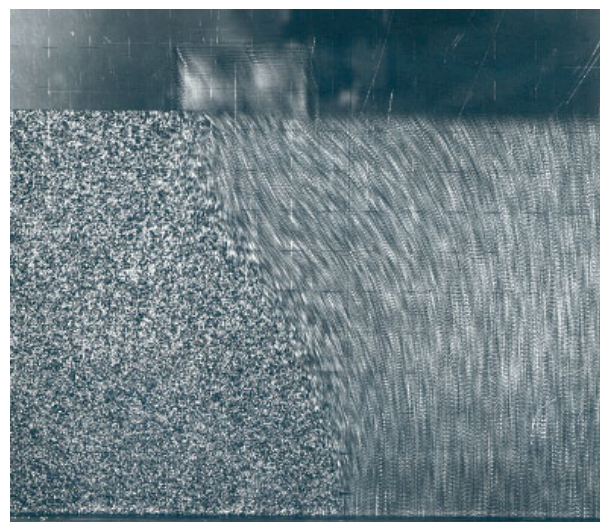
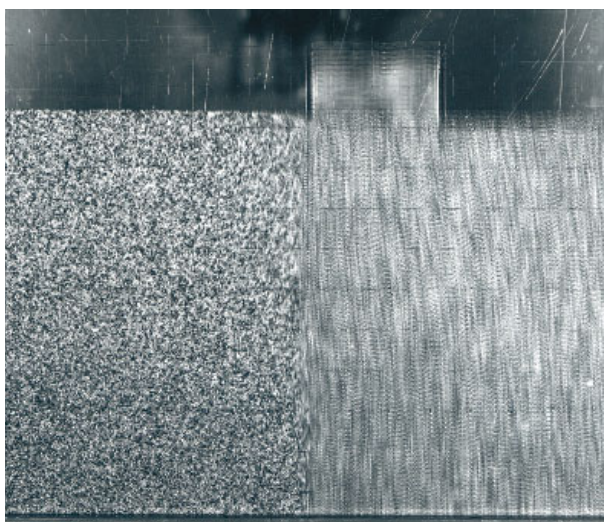


Rys. 5. Kierunki maksymalnych naprężeń głównych w budynku i podłożu na kolejnych etapach analizy



Rys. 6. Urządzenie do badań modelowych T. Ryncarza

cydowano zrealizować eksperymenty ze znacznie mniejszym obciążeniem powierzchni modelu. Przedstawione poniżej wyniki eksperymentów są wstępną próbą, która pozwoli na określenie zależności pomiędzy przemieszczeniami występującymi w wyniku eksploatacji a zachowaniem się obiektu usytuowanego na powierzchni modelu.



Rys. 7. Wpływ obciążenia powierzchni modelu na ruch piasku (zdjęcia poklatkowe)

Eksperymenty realizowano na urządzeniu do badań modelowych z przesuwczą szczeliną wysypową. Opis urządzenia omówiono w pracach (Knothe i in. 2000; Cygan i in. 2000).

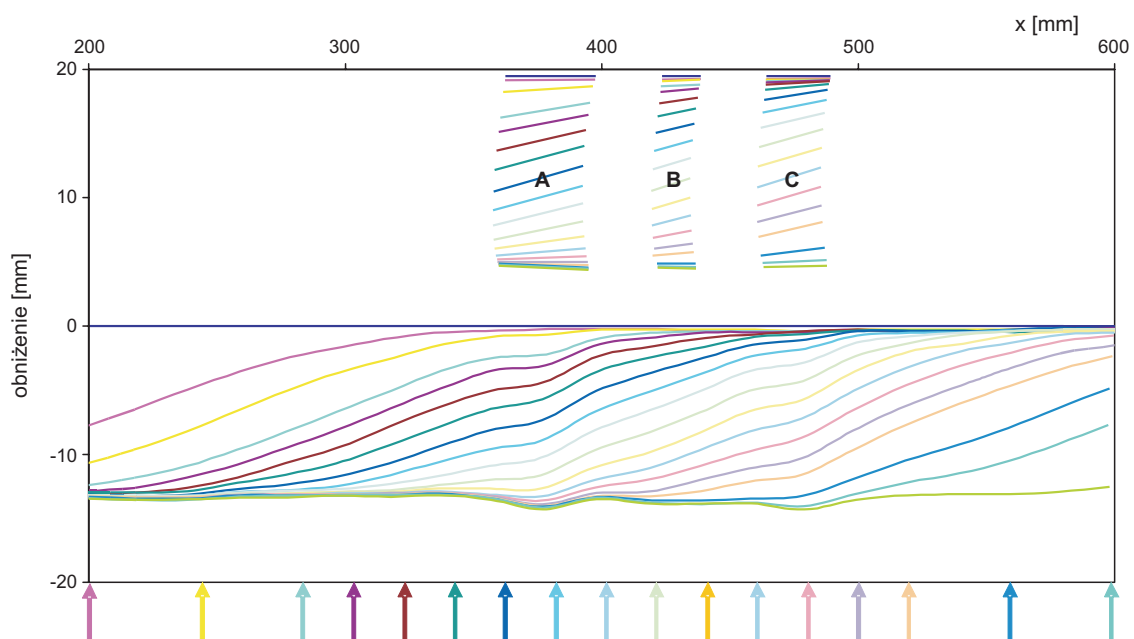
Jako ośrodek sytki zastosowano piasek niezagęszczony. Wysokość modelu wynosiła $H = 320$ mm. Pod powierzchnią modelu na poziomie $H = 300$ mm umieszczono linię pomiarową złożoną z 21 punktów pomiarowych. Odległości pomiędzy punktami pomiarowymi wynosiły 20 mm. Na powierzchni modelu rozmieszczono trzy „obiekty” o długościach: 40 mm (A), 20 mm (B) i 30 mm (C) – były to skrzynki z blachy aluminiowej wypełnione śrutem ołowianym. Wagę poszczególnych skrzynek dobrano tak, aby obciążenie przez nie powierzchni modelu było jednakowe i wynosiło $3\text{g}/\text{cm}^2$ – było ono zatem o rząd wielkości niższe w stosunku do wcześniej realizowanych eksperymentów. Na ścianie czołowej skrzynek umieszczono po dwa krzyże pomiarowe (rys. 8).



Rys. 8. Rozmieszczenie obiektów na powierzchni modelu i położenie linii pomiarowej

Przebieg eksperymentu wyglądał następująco: szczelina wysypowa realizująca „eksploatację” przesuwała się od lewego brzegu skrzyni modelowej ze stałą prędkością w kierunku prawego brzegu. Kolejne zatrzymania szczeliny wysypowej (co 20 mm) realizowały poszczególne etapy eksperymentu. Eksploatacja zbliżała się do obiektu, przechodziła pod nim i następnie oddalała się – zrealizowano 17 etapów eksperymentu. Ilość usuniętego przez szczelinę wysypową piasku w dnie skrzyni modelowej odpowiadała zadaniu w dnie skrzyni obniżenia ok. 6 mm. Stan zerowy i poszczególne etapy eksperymentu rejestrowane były przy użyciu aparatu cyfrowego. Zdjęcia cyfrowe po wprowadzeniu do komputera stanowiły bazę danych do określenia przemieszczeń pionowych i poziomych na linii pomiarowej oraz przemieszczeń obiektów znajdujących się na powierzchni modelu.

Na rysunku 9 przedstawiono wykresy niecek obniżeniowych dla wszystkich kolejnych etapów eksperymentu oraz obniżenia obiektów A, B, C usytuowanych na powierzchni modelu. Przebieg niecek obniżeniowych jest regularny, związany z kolejnymi położeniami szczeliny wysypowej. Na skutek usytuowania

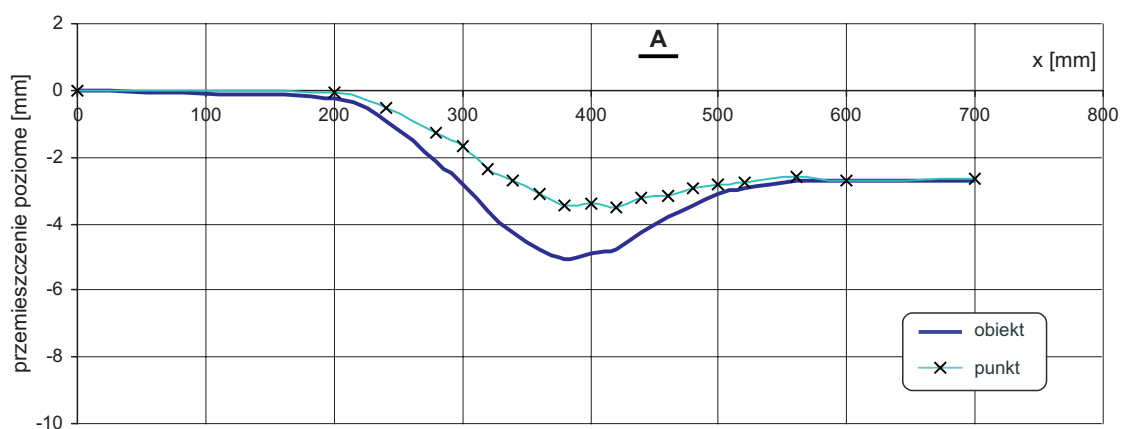


Rys. 9. Niecki obniżeniowe (krzywe na rysunku), przemieszczenia i nachylenia obiektów (odcinki u góry) i położenia szczeliny w kolejnych fazach (strzałki na dół)

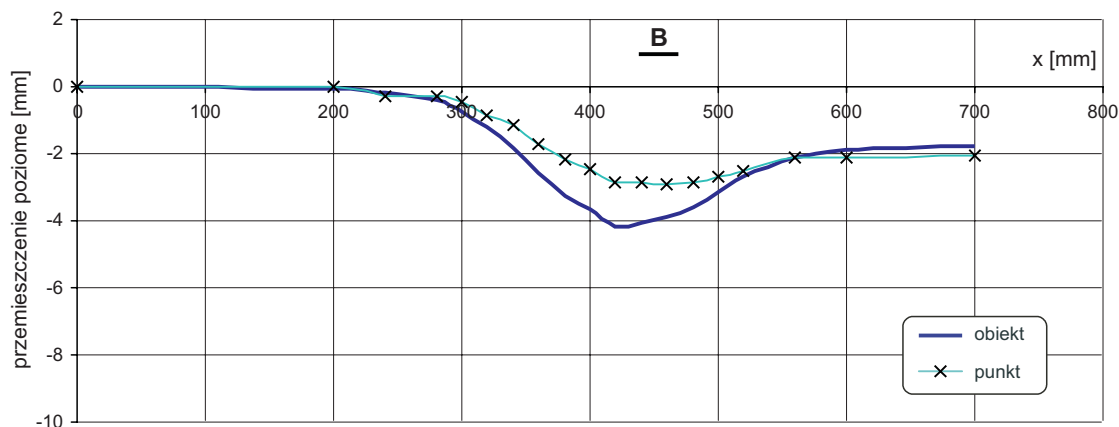
na powierzchni modelu obiektów A, B, C występują lokalne zwiększenia obniżeń na linii pomiarowej bezpośrednio pod każdym z obiektów – największe zakłócenie występuje pod obiektem o największej długości (A), nieco mniejsze pod obiektem C oraz bardzo nieznaczne pod najkrótszym obiektem (B). Wielkość zarejestrowanych zaburzeń ma najprawdopodobniej związek z usytuowaniem linii pomiarowej. Biorąc pod uwagę, że przyjmuje się jako wysokość tzw. „bryły współpracującej podłoża” w przybliżeniu długość obiektu, wpływ najkrótszego z obiektów nie został uchwycony w przeprowadzonych na tej linii pomiarach.

Zwiększenie obniżeń pojawia się w chwili, gdy front eksploatacji zbliża się do obiektu na ok. 80 mm i utrzymuje się przy dalszym przesuwaniu się frontu. Na takie kształtowanie się obniżeń ma wpływ zagęszczanie ośrodka w trakcie eksploatacji a dodatkowe zwiększenie wartości obniżeń pod obiektami spowodowane jest prawdopodobnie lokalnym ekranowaniem wpływów w wyniku obciążenia generowanego przez obiekt usytuowany na powierzchni modelu. Nachylenia obiektów (rys. 9) są zgodne z nachyleniami niecek obniżeniowych we wszystkich fazach eksperymentu. Obiekty wychylają się w kierunku zbliżającej się eksploatacji, największe nachylenie występuje w chwili przechodzenia frontu eksploatacji pod obiektem a następnie nachylenie obiektu maleje. Gdy front znajduje się za obiektem w znacznej odległości obiekty powracają do położenia wyjściowego.

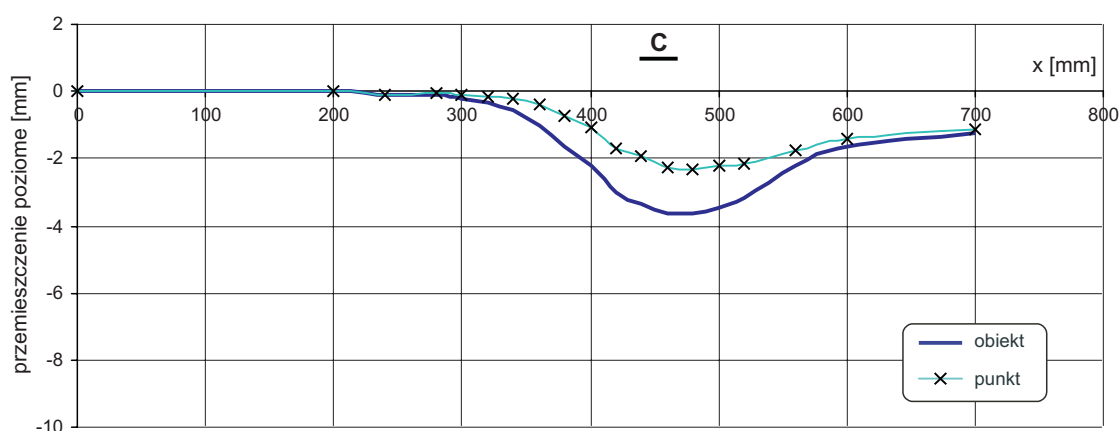
Na rysunkach 10-12 przedstawiono wykresy przesunięć poziomych obiektów (A, B, C) oraz punktów pomiarowych usytuowanych w ośrodku ok. 20 mm pod nimi w trakcie realizacji poszczególnych etapów eksperymentu. Nieznaczne przesunięcia poziome obiektu A (rys. 10) w kierunku zbliżającej się eksploatacji pojawiają się w chwili, gdy eksploatacja jest w odległości ok. 120 mm, następnie z postępem eksploatacji rosną i osiągają wartość maksymalną w chwili, gdy eksploatacja przechodzi pod obiektem. Po przejściu eksploatacji poza obiekt wartości przesunięć poziomych maleją, obiekt przesuwa się za oddalającą się eksploatacją. Gdy front eksploatacji znajduje się ok. 120 mm za obiektem wartości przesunięć poziomych ustalają się i w trakcie dalszej eksploatacji pozostają stałe i stanowią ok. 50% wartości maksymalnych, obiekt nie wraca w pierwotne położenie. Jest to spowodowane zmianą właściwości ośrodka w trakcie eksploatacji – w pierwszej fazie eksperymentu ośrodek jest niezagęszczony a po przejściu eksploatacji ośrodek ulega zagęszczeniu, co powoduje zmniejszenie przesunięć. Przesunięcia poziome obiektu są ściśle związane z przesunięciami występującymi w ośrodku pod wpływem eksploatacji. Różnica polega tylko na tym, że przesunięcia poziome obiektu są większe niż przesunięcia w ośrodku ok. 20 mm pod obiektem (gdzie umieszczony jest punkt pomiarowy), co jest spowodowane zmianami właściwości warstwy ośrodka pomiędzy linią pomiarową a obiektem pod wpływem eksploatacji i dodatkowo lokalnym obciążeniem obiektem. Przebiegi przesunięć poziomych dla obiektu B (rys. 11) i obiektu C (rys. 12) są bardzo podobne do przebiegu przesunięć poziomych dla obiektu A (rys. 10) – maksymalne wartości przesunięć występują, gdy front eksploatacji przechodzi pod obiektem. Przesunięcia po przejściu frontu poza obiekt nie wracają do pierwotnej wartości, przesunięcia poziome obiektu są większe niż przesunięcia punktu pomiarowego usytuowanego w ośrodku pod obiektem.



Rys. 10. Przesunięcia poziome obiektu A oraz punktu pomiarowego pod obiektem A



Rys. 11. Przemieszczenia poziome obiektu B oraz punktu pomiarowego pod obiektem B



Rys. 12. Przemieszczenia poziome obiektu C oraz punktu pomiarowego pod obiektem C

Podsumowując przedstawione powyżej wyniki wstępnych badań można stwierdzić, że umieszczenie na powierzchni modelu obiektów wpływa na zakłócenie przebiegu obniżenia i przesunięć poziomych w ośrodku. Kolejne eksperymenty pozwolą na określenie, jaki wpływ na zachowanie się obiektów ma stopień obciążenia powierzchni obiektem (w omówionych powyżej badaniach stopień obciążenia był jednakowy dla wszystkich obiektów i wynosił 3 g/cm^2) a także na dokładniejsze uchwycenie oddziaływania obiektów o mniejszych wymiarach, poprzez zastosowanie siatki punktów pomiarowych w „podłożu” (zamiast dotychczas stosowanej linii).

Podsumowanie

W artykule omówiono rezultaty prac nad doskonaleniem i rozwijaniem opracowanej w IMG PAN metodyki modelowania numerycznego współpracy budowli z podłożem, które ulega deformacjom wskutek podziemnej eksploatacji złóż. Metodyka ta ukierunkowana jest na prowadzenie szczegółowych analiz dla obiektów, które, z różnych względów, wymagają indywidualnego podejścia do prognozowania wpływu eksploatacji na ich układ konstrukcyjny. Analiza prowadzona jest w oparciu o modelowanie numeryczne metodą elementów skończonych w oparciu o pakiet programów MES Abaqus.

Najważniejsze atuty prezentowanej metodyki stanowią:

- Symulowanie kształtowania się niecki jako procesu ciągłego w czasie i przestrzeni, co daje możliwość analizowania stanu konstrukcji i jej podłoża w dowolnym momencie prowadzenia eksploatacji oraz po jej zakończeniu a także pozwala rozpatrywać oddziaływanie tego procesu jako całości, bez sztucznego podziału na skutki poszczególnych wskaźników deformacji.

- Zastosowanie prawa materiałowego uwzględniającego złożone procesy plastyczne i reologiczne kierujące powstawaniem i rozwojem trwałych deformacji gruntu, dzięki czemu uwzględnione zostaje „amortyzujące” działanie podłoża przejmującego znaczną część niekorzystnych efektów eksploatacji.
- Możliwość prowadzenia analizy dla dowolnego usytuowania obiektu w stosunku do kierunku eksploatacji.
- Możliwość symulowania nakładania się wpływów eksploatacji kolejnych ścian i pokładów.

Dużą zaletą przyjętej metodyki rozwiązywania rozważanego zagadnienia jest też jego ogromna elastyczność, która stwarza szerokie możliwości jej rozwoju.

Planowane jest także rozpoczęcie prac na weryfikacją opracowanej metodyki w oparciu o wyniki pomiarów geodezyjnych na budynkach posadowionych na terenach objętych wpływem eksploatacji górniczej.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w ramach działalności statutowej IMG PAN w roku 2006.

Literatura

- ABAQUS Theory Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., U.S.A., 1998
- Budzanowski Z., Lessaer S. 1966: *O osiadaniu fundamentów posadowionych na sypkim gruncie podlegającym rozpełzaniu w czasie eksploatacji górniczej*. Archiwum Inżynierii Łądowej.
- Cygan J., Leśniak J., Pielok W., Rogowska J., 2000: *Kształtowanie się przemieszczeń w górotworze o różnym stopniu naruszenia wcześniejszymi eksploatacjami na podstawie badań modelowych na ośrodku sypkim pionowo niejednorodnym*. Cz. 1, Prace IMG PAN, t. 2, nr 3-4.
- Florkowska L. 2003: *Wybrane problemy współdziałania budowli z górotworem*, Prace IMG PAN, Rozprawy, monografie 3, Kraków.
- Knothe S. 1953a: *Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, vol. I, nr 1-, s. 22-38.
- Knothe S. 1953b: *Wpływ czasu na kształtowanie się niecki osiadania*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, t. 1, z. 1.
- Knothe S., Leśniak J., Pielok W., Rogowska J., 2000: *Möglichkeiten der Anwendung der Modelluntersuchungen zur Klärung von Fragen der Abbaueinflüsse auf den Prozess der Gebirgisverschiebungen*. 11 International Congress of the International Society for Mine Surveying, Cracow.
- Majewski S. 1995: *Sprężysto-plastyczny model współpracującego układu budynek-podłoże poddanego wpływom górniczych deformacji terenu*. Politechnika Śląska, Zeszyty Naukowe, Nr, Gliwice.
- Phoon K., Chan S., Toh K., Lee F. 2003: *Fast iterative solution of large undrained soil-structure interaction problems*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 27: 159-181.
- Ryncarz T., 1960: *Wpływ obciążenia powierzchni terenu na jej odkształcenia nad wyrobiskami górniczymi*, praca doktorska, niepublikowana
- Xie H., Chen Z., Wang J. 1999: *Three-dimensional numerical analysis of deformation and failure during top coal caving*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36, 651-658.

The methodology of the numerical analysis of interaction between the building and his base that deform by reason of underground exploitation

Abstract

In the article some results of works on improving and developing methodologies of numerical modelling the cooperation of the building with its base were discussed. The case, where the base is subjected to deformations caused by underground exploitation was considered. All results were worked out in Strata Mechanics Research Institute of Polish Academy of Sciences.

This methodology is dedicated for conducting detailed analyses for objects, which, from different reasons, require the individual approach for forecasting the influence of the exploitation on their structural system. The analysis bases on numerical modelling by means of finite element method (FEM) with using the package of FEM Abaqus programs.

The most important advantages of presented methodology are determined as follows:

- Simulating of a subsiding trough shaping as the continuous process in the time and space; this gives the possibility of analysing the state of structure and its base in the any moment of leading the exploitation and after finishing it and it also allow to consider the influence of this process as wholes, without artificial divisions to effects of particular deformation ratios.
- Applying material law with taking into consideration complex plastic and rheological processes supervising coming into existence and the development of permanent set of ground; this way it is possible to take into consideration an “amortizing” effect of base taking over the considerable part of disadvantageous effects of the exploitation is staying.
- Possibility of conducting analysis for any location the object with respect to direction of the exploitation.
- Possibility of simulating of superposition some other influences of the exploitation coming from next longwalls and beds.

One of the advantages of the accepted methodology of solving the considered problem there is also its huge elasticity which creates wide abilities of its development.

Keywords: numerical modelling, FEM, mining damage, building, subsoil

Recenzent: Prof. dr hab. inż. *Edward Popiolek*, AGH